

躺姿半弹道式再入假人动态响应研究

祝郁¹, 肖艳华¹, 王健全¹, 刘炳坤¹, 费锦学¹, 国耀宇¹, 邓金辉¹, 孙浩², 付文文³, 马红磊^{1*}

¹中国航天员科研训练中心, 北京

²航天工程大学, 北京

³北京航天飞行控制中心, 北京

Email: *mahlei@163.com

收稿日期: 2020年11月27日; 录用日期: 2020年12月23日; 发布日期: 2020年12月30日

摘要

为了探索躺姿半弹道式再入时的人体动态响应, 模拟Apollo10返回再入过载环境, 采集Hybrid III生物力学假人头部、胸部及臀部的加速度动态响应数据, 对比分析阿波罗再入躺姿状态下假人不同部位的动力学响应规律。结果显示假人重要部位的动态响应与再入模式下的过载曲线变化趋势基本一致, 各部位合成加速度值较为接近。+G_x为主要过载响应, 且胸部响应过载值较大, 应加强乘员胸背向加速度防护。该实验研究为载人深空探测工程实践提供了数据基础, 并给出明确的工程指导意见, 为载人加速度耐限制定及安全防护设计提供指导。

关键词

半弹道式再入, 持续性加速度, 生物力学假人, 加速度防护

Study on Response of Dummy in Lying Position under Semi-Ballistic Reentry Overload

Yu Zhu¹, Yanhua Xiao¹, Jianquan Wang¹, Bingkun Liu¹, Jingxue Fei¹, Yaoyu Guo¹, Jinhui Deng¹, Hao Sun², Wenwen Fu³, Honglei Ma^{1*}

¹China Astronaut Research and Training Center, Beijing

²Space Engineering University, Beijing

³Beijing Aerospace Command Control Center, Beijing

Email: *mahlei@163.com

Received: Nov. 27th, 2020; accepted: Dec. 23rd, 2020; published: Dec. 30th, 2020

*通讯作者。

文章引用: 祝郁, 肖艳华, 王健全, 刘炳坤, 费锦学, 国耀宇, 邓金辉, 孙浩, 付文文, 马红磊. 躺姿半弹道式再入假人动态响应研究[J]. 国际航空航天科学, 2020, 8(4): 108-113. DOI: 10.12677/jast.2020.84014

Abstract

To explore the dynamic response of human body during semi-ballistic reentry in lying posture, the acceleration dynamic response data of head, chest and buttocks of Hybrid III biomechanical dummy were collected to simulate Apollo 10 reentry overload environment, and the dynamic response laws of different parts of Apollo re-entry dummy were compared and analyzed. The results show that the dynamic response of the important parts of the dummy is basically consistent with the overload curve under reentry mode, and the resultant acceleration values of each part are close. The main overload response is +G_x, and the overload response of chest is relatively larger, so it is necessary to strengthen the G_x protection of crew. This paper provides an experiment basis for the designing on the enter strategies of spacecraft. Based on this result, the designer could choose the optimal strategies to avoid injury.

Keywords

Semi-Ballistic Reentry, Sustained Acceleration, Biomechanical Dummy, Acceleration Protection

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

航天载人登月的关键之一是月地返回再入加速度安全[1] [2] [3]。虽然 20 世纪 70 年代, 美国已实现了载人登月返回, 苏联实施了无人飞船绕月飞行并返回, 我国经过多年发展, 已掌握近地轨道载人航天器返回与回收技术, 成功完成多颗返回式卫星、多艘载人飞船返回与回收以及嫦娥五号飞行试验器任务[4], 但是以第二宇宙速度载人月地返回再入仍有诸多重大问题尚待解决。根据国外载人登月工程实践特点分析认为, 载人探月飞行任务的返回再入区别于近地轨道载人飞行返回, 与近地轨道返回相比, 航天员要承受更为严酷的再入加速度过载环境。目前根据飞行器负荷和再入速度不同主要选用两种返回方式, 一是钱学森式弹道经受高温直接冲过大气层, 该方式适合第一宇宙速度以下的近地轨道返回, 如联盟号和神舟载人飞船; 二是通过桑格尔弹道跳跃式来减速降温, 如阿波罗登月载人飞船[5] [6]、嫦娥五号 T1 试验返回器(CE-5T1)以接近第二宇宙速度跳跃式返回再入[7] [8]。如果不采用跳跃式飞船加速度可达 15 g 左右, 严重威胁航天员的生命安全。再入方式不同, 飞行器所经历升阻力不同, 相应所受加速度不同。相比而言, 载人登月返回过程中, 乘员将会经受更高峰值、增长率及复杂波形的加速度作用, 导致乘员损伤风险显著增加, 如有应急情况, 过载安全问题更为突出。目前, 美国 NASA 仍在进行返回再入加速度耐受性问题的相关研究。根据我国载人登月计划需求, 及时开展返回再入加速度耐受性及防护技术研究, 对明确登月任务返回再入乘员安全性设计具有重要意义。

借助载人飞行来获得高速再入人体加速度响应和生理效应等规律, 实施代价高、安全风险大, 通常先期采用地面分析、仿真和试验进行验证。我国目前也在开展相应研究, 有学者采用 HUMOS 生物力学假人, 开展再入过载条件下典型体位响应仿真研究, 分析认为体位姿态对膈肌的位移和变形是影响人体对再入过载耐受力的最重要因素, 并建议飞船乘员的姿态设计应优先选择躺姿[9]。本研究通过地面设备模拟躺姿阿波罗再入加速度环境, 按联盟号飞船的乘员座椅姿态设计乘员方案, 分析其再入方式过载条件下, 假人重要部位的动力学响应规律, 为载人飞行器第二宇宙速度返回再入的人体安全性和防护设计提供试验基础。

2. 方法

2.1. 载荷设计

根据阿波罗飞行任务资料[5] [6], Apollo 11 号再入角为 -6.48° , 再入速度为 11.03 km/s, 最大过载约 6.73 G, 在飞行到距地面 50 公里左右出现了弹跳, 其最高弹跳高度为 67 km, 此后下降直到着陆。由于未获取到 Apollo 11~17 载人登月任务返回过载的有效数据, 以飞行参数相近的 Apollo 10 号再入加速度曲线作为试验过载环境。其中, 再入过载第一峰值约 6.67 G, 跳跃过载第二峰值约 4.5 G, 两次过载峰值间最低点为 1.4 G。

设计过载环境时, 为了研究在不同载荷下假人响应的变化规律, 对 Apollo 10 号返回器过载曲线波峰部分作适度调整, 分别设置四组不同峰值的模拟过载曲线, 曲线其他部分数值按比例调整, 峰值间隔时间保持不变。设计的四组过载第一峰值分别为 10.4 G、8.07 G、6.4 G 和 4.2 G, 总作用时间约 550 s。

2.2. 测试布点

离心实验中, 采用阿波罗的乘员体位(见图 1)、联盟座椅方式及 HybridIII 生物力学假人。使用 MSR165 三向加速度记录仪[10], 最大量程 ± 15 g, 记录人体加速度响应, 分别在假人的头部质心位置、胸骨、腰部, 采样频率为 800 Hz/CH。



Figure 1. Seat-dummy system in supine position
图 1. 假人离心实验姿态

3. 结果

3.1. 离心机输出

根据阿波罗飞船返回跳跃式再入轨迹, 编制离心机 G 值文件, 调试各设备控制参数, 模拟载人飞船再入过程持续变化的加速度作用环境。得到重复性良好的四组输出过载曲线, 如图 2 所示。四组过载输出第一峰值分别为 10.45 G、8.05 G、6.41 G 和 4.35 G, 总作用时间约 550 s。离心机模拟的半弹道式返回再入过载曲线满足设计要求。

3.2. 假人加速度响应

假人头部、胸部及腰部加速度结果见图 3。结果显示随着载荷增加, 三个部位的合成加速度也相应增加, 趋势和输入载荷一致, 其中四个过载输入下假人不同部位的最大响应见表 1。

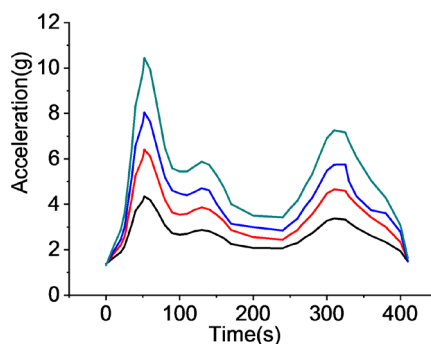


Figure 2. Output of centrifuge
图 2. 离心机输出过载曲线

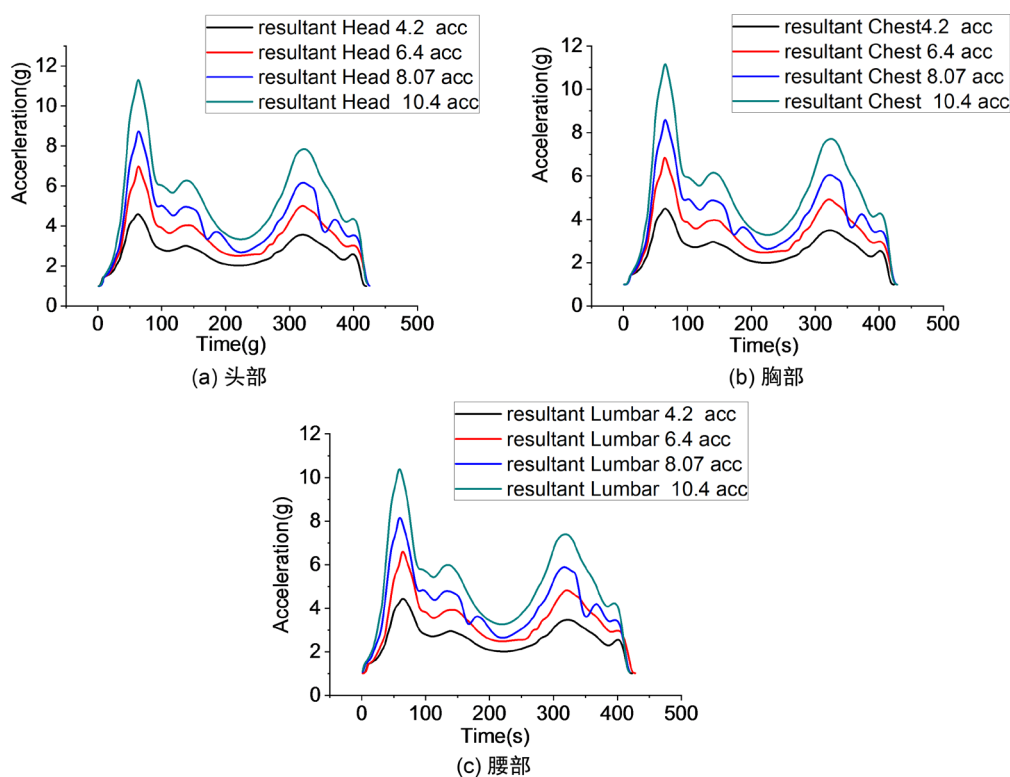


Figure 3. Acceleration response of dummy head, chest and waist
图 3. 假人头部、胸部和腰部的加速度响应

Table 1. Maximum response of different parts of dummy under four overload inputs
表 1. 四个过载输入下假人不同部位的最大响应

设计过载	离心机输出最大过载(时刻/s)	头部	胸部	腰部
		响应最大过载/g (时刻/s)		
4.2acc	4.35 (52)	4.59 (63)	4.50 (65)	4.43 (65)
6.4acc	6.41 (52)	6.97 (64)	6.84 (65)	6.60 (64)
8.07acc	8.05 (52)	8.74 (64)	8.60 (65)	8.15 (60)
10.4acc	10.45 (52)	11.29 (63)	11.17 (65)	10.38 (59)

3.3. 假人加速度响应分量

载人离心机输出过载第一峰值为 8.05 G，总作用时间约 550 s。假人头部、胸部和腰部沿胸背向的加速度响应分量见图 4，三个部位沿 Gx 最大过载分别是 7.58、8.32、7.69 (见表 2)。

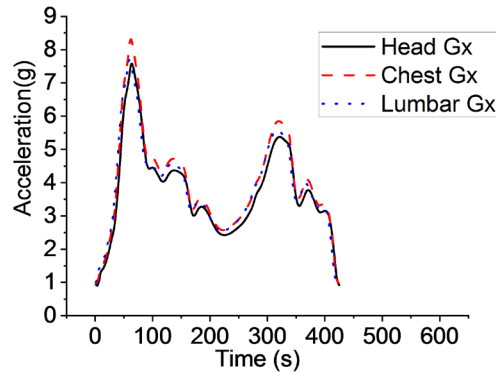


Figure 4. Acceleration response components of dummy head, chest and waist along Gx
图 4. 假人头部、胸部和腰部沿胸背向的加速度响应分量

Table 2. Maximum overload of dummy along Gx
表 2. 假人沿 Gx 最大过载

方向	头部	胸部	腰部
	加速度最大过载/G		
Gx	7.58	8.32	7.69

4. 讨论

本研究采用联盟座椅，假人体位为躺姿，载荷模拟阿波罗返回工况特征，过载由低到高，作用时间保持一致。在这种工况下，随着过载的增加，头部、胸部、腰部加速度响应也增加，作用时间与过载保持一致。对比头部、胸部、腰部 Gx 方向的加速度，胸部略高于头部和腰部(见图 4)；由于是平躺，头盆向加速度可以不予考虑。

躺姿假人胸部具有相对较高的过载峰值(见表 2)，对呼吸和心肺功能影响最大。由于下肢没有折回弯曲，可以保持畅通体液转移，同时，对腹部没有挤压，不会限制膈肌上移，对超重对抗的腹式呼吸动作和效果、超重不会造成不利影响。

研究表明，持续性加速度诱发的头部生理效应包括引起视觉功能障碍、意识丧失、脑功能受损[11][12]，并对心血管系统、呼吸系统等有不同程度的影响[13][14]。暴露于+Gx 作用时，沿加速度方向的血液流体静压差加大，加之血管的可扩张性，导致血液在体内沿加速度方向重新分配；同时，胸腔前后径变短，加上腹腔内容物的挤压和膈肌上移，致使胸腔容量明显减小，易造成限制性呼吸困难和胸痛。Apollo 10 号返回器因未完全跳出大气层，其加速度响应在 3 G 以上的持续作用时间较长。根据近地轨道飞行再入经验，持续较高的过载必然给乘员带来不适的体验。因此，载人航天器选择跳跃式方式再入时，应考虑乘员不同部位的胸背向加速度耐力防护策略。

5. 结论

本文对利用离心机模拟阿波罗返回再入过载，探讨躺姿人体姿态载入方式对假人动态响应的影响。结果表明模拟阿波罗载入返回过载时，假人头部、胸部、腰部三个重要部位均有较大+Gx 加速度响应，验

证了文[9]部分仿真结果。尤其假人三个部位中,胸部+Gx 最大,将对人员呼吸产生很大影响;与胸部暴露水平接近的头部,也将会产生更为复杂的生理效应。因此,为避免载人深空探测再入暴露于高 G 值造成的人员损伤和带来的任务风险,需要进一步研究制定科学合理的医学要求。本实验研究为载人深空探测工程实践提供了数据基础,为再入加速度耐限制定及安全防护设计提供依据。

基金项目

中国载人航天领域预先研究项目(020101)。

参考文献

- [1] 叶培建, 杨孟飞, 彭兢. 中国深空探测进入/再入返回技术的发展现状和展望[J]. 中国科学: 技术科学, 2015(3): 229-238.
- [2] 左光, 候砚泽, 陈冲, 等. 载人航天器月地返回再入问题研究[J]. 航天器工程, 2013, 22(6): 112-118.
- [3] 贾世锦. 载人登月返回再入有关问题初步研究[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(2): 18-25.
- [4] 龙乐豪. 关于中国载人登月工程若干问题的思考[J]. 导弹与航天运载技术, 2010(6): 1-5.
- [5] Claude, A. (1972) Apollo Experience Report Mission Planning for Apollo Entry. NASA TN 6725.
- [6] James, O.R. (1969) Apollo Entry Summary Document Mission F. NASA Manned Space Center N70-34184.
- [7] 苏杭. 探月飞船返回跳跃式再入轨迹规划与制导研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨工业大学, 2012: 1-9.
- [8] 王帅帅. 探月飞船跳跃式再入参数在线估计与先进制导方法研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [9] 孙浩, 马红磊, 刘炳坤, 等. 典型返回再入体位对 HUMOS 假人动态响应影响研究[J]. 国际航空航天科学, 2020, 8(4).
- [10] Steve, R. and Wendelin, E. (2012) Measurement of Airplane Structure through MSR165 Data Recorder. *EDN China*, 19, 52-54.
- [11] 吴萍, 吴斌, 黄伟芬, 等. 中长期飞行对人体超重耐力的影响及防护[J]. 载人航天, 2013, 19(1): 81-85.
- [12] 吴萍, 吴斌, 陈晓萍, 等. 中长期飞行对人体超重耐力影响及防护技术研究[J]. 载人航天, 2015, 21(2): 171-178.
- [13] 薛月英, 由广兴, 吴斌, 等. 抗+Gx 作用呼吸动作和训练方法的研究[J]. 航天医学与医学工程, 2002, 15(6): 402-405.
- [14] 薛月英, 刘光远, 谢宝生, 等. 不同方向超重作用下(犬)心血管系统反应规律的探讨[J]. 航天医学与医学工程, 2000, 13(2): 104-108.